

Dynamique de ligaments fortement étirés

Lionel Vincent^a, Laurent Duchemin^a, Stéphane Le Dizès^a, Emmanuel Villiermaux^a

a. IRPHE, CNRS & Aix-Marseille Université, 49 rue F. Joliot-Curie, 13013 Marseille, France

Résumé :

Nous présentons un travail expérimental sur la dynamique d'un volume de liquide axisymétrique soumis à un étirement axial vigoureux. Le volume de liquide est initialement sous la forme d'un pont liquide tenu entre deux mors coaxiaux de diamètres millimétriques, ou d'une goutte pendante suspendue au mors supérieur. Le supérieur est mis en mouvement à vitesse constante, ou accélération constante, générant un ligament élancé qui finit par se rompre sous l'effet de la tension de surface. Nous proposons une description des mécanismes et une prédiction pour le temps de rupture dans chaque cas. Si l'accélération du mors est constante, nous montrons que le temps de rupture est indépendant de la tension de surface, résultat remarquable pour un phénomène capillaire.

Abstract :

We study experimentally the breakup of an axisymmetric liquid volume undergoing strong axial stretching. The liquid volume is initially held by surface tension between two millimetric supporting rods -as a liquid bridge- or suspended to the upper rod. The upper rod is promptly set into a vertical motion, leading to the formation of a slender ligament that eventually breaks. We find that if the rod acceleration is constant, the breakup time is independent of surface tension, which is a singular result for a capillary phenomenon.

Mots clefs : ligament ; étirement ; rupture ;

Si les ponts liquides ont fait l'objet de nombreux travaux, en particulier concernant l'étude de leur stabilité depuis les travaux pionniers de Plateau en 1863 [?], l'effet de l'étirement sur la déstabilisation d'un pont liquide est peu représenté dans la littérature. Des travaux expérimentaux concernant les ponts soumis à une vitesse axiale suggèrent que l'inertie induit un renflement du pont dans sa partie centrale [2] susceptible de retarder la rupture capillaire, et permet d'augmenter sensiblement la longueur entre mors à rupture [8]. Dans de tels régimes de vitesse, caractérisés par un temps d'étirement e/U plus grand ou du même ordre que le temps capillaire $\tau_c = \sqrt{\rho e^3 / \sigma}$, la déstabilisation du pont liquide provoque sa rupture dans un temps toujours proche de τ_c [1]. ρ et σ sont respectivement la masse volumique et la tension de surface du liquide, U est la vitesse imposée, et e le rayon des mors.

Le but de ce travail est de comprendre les phénomènes mis en jeu lorsque le temps d'étirement est plus petit que le temps capillaire. Les expériences montrent le développement d'un ligament élancé, de longueur bien supérieure au diamètre des mors, qui finit par se rompre sous l'effet de la tension de surface (c.f. figure 1) ; nous montrons que le temps de rupture, compté depuis le seuil de l'instabilité capillaire, peut s'écarter sensiblement de τ_c .

Le dispositif expérimental assurant une accélération constante est constitué d'un axe guidé verticalement, à la base duquel est vissé un cylindre de métal de diamètre millimétrique -appelé mors supérieur-, et relié mécaniquement à un ressort initialement retenu par un fil de nylon. Une goutte de liquide est suspendue au mors supérieur. Dans le cas du pont liquide, un deuxième mors est ajouté comme support inférieur. La rupture du fil de nylon libère le ressort, qui entraîne l'ensemble axe+mors à accélération constante $\gamma_0 \leq 1200 \text{ m.s}^{-2}$. Le dispositif assurant une vitesse constante utilise le même système de ressort pour mettre en mouvement un tube, à l'intérieur duquel a été pratiqué une longue lumière. Un mobile, dans lequel est vissé le mors supérieur portant la goutte pendante, est insérée au

milieu de la lumière et maintenue faiblement en position par un aimant. A la rupture du fil de nylon, le tube accélère et son extrémité basse percute et propulser la capsule à vitesse constante $U \leq 10$ m/s. Les expériences sont réalisées avec de l'eau et de l'éthanol, qui ont des viscosités μ similaires (1 mPa.s et 1.2 mPa.s respectivement), des masses volumiques ρ comparables (1000 Kg/m³, 789 Kg/m³), et des tensions de surface σ très différentes (65 mN/m, 22 mN/m). La distance caractéristique est e le rayon du mors, choisi parmi 0.5 - 1 - 1.5 - 2.5 mm. La vigueur de l'étirement est rapportée aux effets capillaires via le nombre de Bond $\rho\gamma e^2/\sigma$ avec $\gamma = \gamma_0 + g$ pour le cas accélération constante, et le nombre de Weber $\rho e U^2/\sigma$ pour le cas à vitesse constante. Les effets de la viscosité, de la gravité, et de l'air environnant ne sont pas considérés. La dynamique est enregistrée à l'aide d'une caméra rapide.

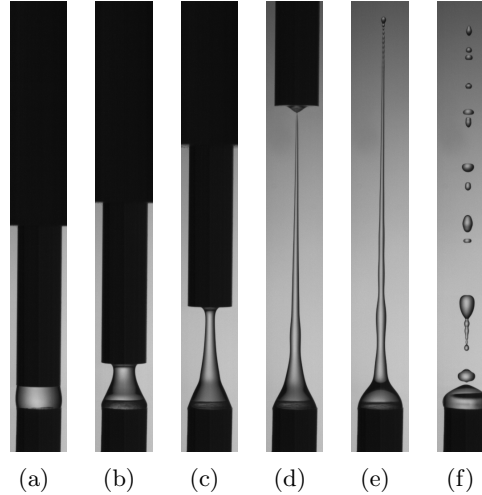


FIGURE 1 – Dynamique d'un pont liquide violemment étiré, $Bo = 25$. Le rayon des mors est $e = 2.5$ mm. $t/\tau_c = 0.00$ (a) 0.26 (b) 0.50 (c) 1.00 (d) 1.35 (e) 2.17 (f). Le pont liquide devient instable en (b), et la rupture correspond à (d). On s'intéresse au temps t_b séparant (b) et (d).

Pour de faibles étirements, et dans la configuration pont liquide, on peut observer ce qui a été mentionné dans les précédentes études : pour $Bo < 7$ le temps de rupture du ligament, compté depuis le seul d'instabilité quasi-statique, est grossièrement indépendant de l'étirement, et vaut le temps capillaire τ_c . On peut néanmoins noter une faible augmentation de t_b avec l'étirement : nous pensons qu'il est dû au renflement inertiel du pont liquide stable évoqué par [2].

Pour des étirements vigoureux, i.e. $Bo > 7$ ou $We > 15$, on constate une importante diminution de t_b avec la vigueur de l'étirement. La rupture capillaire d'un ligament au repos demande d'évacuer une masse de fluide de l'ordre de ρe^3 sous l'effet de la tension de surface, ce qui conduit au temps $\sqrt{\rho e^3/\sigma}$. Nous proposons que dans notre cas, la masse impliquée dans le processus de rupture est une masse $m < \rho e^3$, représentée par la masse portée par le mors supérieur après rupture (c.f. figure 1(d)), induisant un temps de rupture $t_b = \sqrt{m/\sigma}$. Cette relation est en bon accord avec les expériences pour les deux cas d'étirement.

Pour le cas de la vitesse constante, la masse est sélectionnée par l'onde capillaire voyageant à la vitesse du mors, c'est à dire dont la vitesse de groupe est U . On aboutit à $t_b/\tau_c \propto We^{-1/4}$, en très bon accord avec les expériences. Pour le cas accélération constante, la masse est donnée par l'équilibre mécanique d'une goutte pendante sous la gravité apparente γ : $m\gamma = F \propto \sigma e$, aboutissant à $t_b/\tau_c \propto Bo^{-1/2}$, ou sous la forme dimensionnelle $t_b \propto \sqrt{e/\gamma}$, à nouveau en excellent accord avec les données expérimentales. Ce résultat est remarquable pour un phénomène capillaire, car indépendant de la tension de surface.

Il est aussi intéressant de noter que, dans le cas de l'accélération constante, la longueur adimensionnée à laquelle le ligament se brise $\ell_b/e \propto Bo(t_b/\tau_c)^2$, ne dépend plus de l'étirement (on trouve $\ell_b/e \sim 20$ expérimentalement), alors qu'elle augmente avec U dans le cas de la vitesse constante : $\ell_b/e = \sqrt{We}(t_b/\tau_c) \propto We^{1/4}$. Ce résultat suggère, pour des très fortes impulsions, la possibilité, d'observer des ligaments démesurément longs de type cheveux de Pélé [6][7], sans l'intervention d'effets visqueux.

Références

- [1] Eggers, J., Villermaux, E. 2008 Physics of fluid jets. *Rep. Prog. Phy*, **71** 1-79
- [2] Kroger, R. Berg, S., Delgado, A., Rath, H.J. 1992 Stretching behavior of large polymeric and newtonian liquid bridges in plateau simulation. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **45**
- [3] Kroger, R., Rath, H. J. 1995 Velocity and elongation rate distributions in stretched polymeric and newtonian liquid bridges. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **57** 137-153
- [4] Plateau, J. 1873 Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires. Gauthier-Villars, Paris
- [5] Reis, P.M., Jung, S., Aristroff, J.M., Stocker, R. 2010 How cats lap : Water uptake by felis catus *Science*, **330** 1231-1234
- [6] Shimozuru, D. 1994 Physical parameters governing the formation of pele's hair and tears. *Bulletin of Volcanology* **56** 217-219
- [7] Villermaux, E. The formation of filamentary structures from molten silicates : Pele's hair, angel hair, and blown clinker. *Comptes Rendus Mécanique* **340** 555-564
- [8] Zhang, X., Padgett, R., Basaran, O.1996 Nonlinear deformation and breakup of stretching liquid bridges. *J. Fluid Mech.* **329** 207-245